第 38 卷第 8 期 工 程 热 物 理 学 报 Vol.38, No.8
2017 年 8 月 JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS Aug., 2017

直流电场作用下油中水滴的破裂时间特征

罗小明[1] 闫海鹏[1] 王 静[2] 何利民[1]

(1. 中国石油大学 (华东) 山东省油气储运安全省级重点实验室，青岛 266580；
2. 中石化石油工程设计有限公司，东营 257026)

摘 要 采用显微实验与理论分析相结合的方法，对直流电场作用下水滴破裂前的拉伸过程及其时间特征进行了系统研究。结果表明，电毛细数和表面活性剂浓度是影响水滴拉伸过程的关键因素，而油水黏度比和电导率比的影响并不显著。拉伸时间对低电毛细数和高表面活性剂浓度体系更为敏感。在实验范围内，直流电场作用下球形水滴经拉伸并破裂的最小时间为 10 ms。基于此，提出了一种可有效提高水滴静电聚并效率并抑制电分散现象的脉冲电场设计方法。

关键词 直流电场；水滴破裂；瞬态响应；时间特征
中图分类号: TE868 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253–231X(2017)08–1707-07

The Characteristic Time of Water Droplet Breakup in oil Under Direct Current Electric Field

LUO Xiao-Ming[1] YAN Hai-Peng[1] WANG Jing[2] HE Li-Min[1,2]

(1. *Shandong Provincial Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Safety, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;*
2. *Sinopec Petroleum Engineering Design Co., Ltd, Dongying 257026, China*)

Abstract The stretching process and characteristic time before the water droplet breakup are systematically investigated under direct current (DC) electric field with a detailed micro-scale experimental and theoretical analysis. Results indicate that the electric capillary number and the surfactant concentration are the key factors to the stretching process of water droplet, and the influence of viscosity ratio and conductivity ratio is not significant. The stretching time is more sensitive to low electric capillary number and high surfactant concentrations. In the experimental range, the minimum time interval of the droplet deformation before droplet breakup is 10 ms under the DC electric field. Based on these results, a design method of pulse electric field is proposed which is helpful to promote the electrocoalescence efficiency and suppress the electric dispersion.

Key words DC electric field; droplet breakup; transient response; characteristic time

0 前 言

化学驱采油技术被广泛应用于提高油田采收率，通过改变油水界面的特性使油滴更容易从多孔介质中脱附并流出 [1]。虽然表面活性剂等化学剂的添加提高了原油采收率，但导致油水界面由多种物质分子组成，研究发现其复杂结构使油水界面具有剪切弹性、面积扩张弹性、抗弯特性等显著不同于普通油水界面的力学特性。复杂的界面特性与油水物性等相互耦合导致水滴在电场中表现出更加复杂的动力学行为 [2]，这给经典的静电聚并理论和静电聚结技术的应用带来了前所未有的挑战 [3]。

在电场作用下，油中水滴的极化速度随电场强度的增加而增加，当电场强度高于临界值时，诱导油水界面产生不稳定现象，致使水滴破裂成细小水滴 [4]。相对纯油水界面来说，吸附表面活性剂的油水界面具有剪切弹性、抗弯特性等复杂力学特性，导致水滴的破裂响应过程和特征形式变得复杂化和多样化。Taylor 等 [5] 通过实验研究发现，液滴在电场作用下形成锥形尖端，圆锥顶端半角存在临界值为 49.3°，当超过该值时， 锥形表面出现不稳定现象。 Eow 等 [6,7] 研究发现当液滴的长短轴比值达到 1.9 时，界面会出现不稳定现象，并认为液滴的破裂行为与电场强度大小与分布、连续相和分散相的物性有关。叶团结 [8] 研究了液滴发生破裂时的临界破裂角度、临界电场强度以及临界离心率等参数与连续相和分

收稿日期: 2017-02-23; **修订日期**: 2017-07-24
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51574273)；山东省自然科学基金资助项目 (No.ZR2014EEM045)
作者简介: 罗小明 (1980–)，男，副教授，博士，主要从事多相流与多相分离技术研究。 **通信作者**: 何利民，教授，Email: helimin@vip.163.com

散相物性之间的关系。Dubash 等 [9] 研究发现液滴的变形度受电场强度、油水黏度比等因素的影响，并对高强电场下液滴的破裂行为进行了分析。Sherwood 等 [10] 通过模拟得到液滴的两种破裂形式：液滴两端出现尖端流、两端形成与母液滴通过细丝相连的子液滴，并对液滴的破裂形式进行了预测，当液滴的介电常数高于连续相时液滴两端出现尖端，当液滴的电导率高于连续相时液滴两端出现小液滴。Karyappa 等 [11] 研究了直流电场中黏度比和电毛细数对液滴破裂行为的影响，分析得到不同参数下液滴的破裂形式。Yan 等 [12] 通过实验研究了交流电场中液滴的破裂过程及破裂前液滴的演变过程，建立了锥形破裂前液滴的振荡模型。Allan 和 Mason [13] 认为电毛细数 Ca 可作为描述液滴破裂的特征参数，而微观实验 [14]、理论分析 [5,15] 和数值模拟 [16] 也进一步验证了临界电毛细数 Ca_c 在 0.2±0.02 附近。

$$Ca = \frac{r\varepsilon_r\varepsilon_0E^2}{\gamma} \tag{1}$$

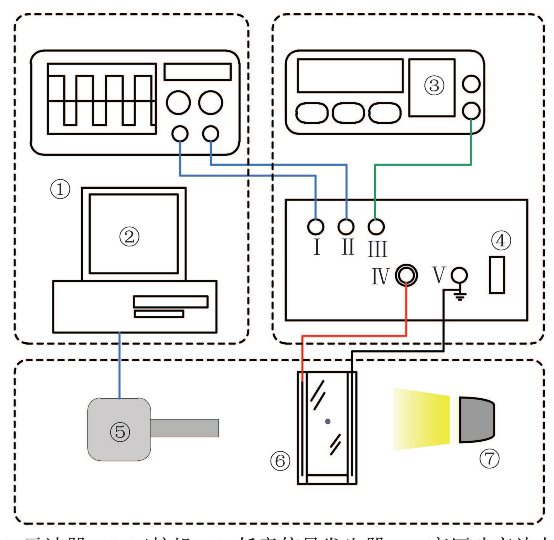
综上所述，液滴在电场中的破裂行为主要受电场参数以及两相性质的影响，目前针对其与液滴在电场作用下的临界破裂条件和破裂形式间的关系已进行了广泛的研究，但对电场作用下液滴破裂的瞬态行为规律仍缺乏深刻认识。瞬态响应时间是表征电场作用下液滴破裂瞬态行为的关键特征参数，其对探究影响水滴破裂行为的关键因素，及控制水滴的破裂过程具有重要的意义。

采用显微实验与理论分析相结合的方法，首先对直流电场作用下水滴破裂前的不同拉伸过程进行了详细描述，之后对水滴破裂前的拉伸时间进行了系统研究，探究了油水黏度比、电导率比及表面活性剂浓度等对拉伸时间的影响规律，并提出了一种基于水滴破裂时间特征的可有效提高水滴静电聚并效率并抑制电分散现象的脉冲电场设计方法。研究成果对完善静电聚并理论体系具有重要的科学意义，同时可为提高电脱水器的分离效率和研发高效电脱设备提供科学依据。

1 实验系统

1.1 实验装置

微观实验采用静电显微高速摄像实验系统拍摄电场作用下油中水滴变形与破裂的微观图像，并结合图像处理软件对图像进行特征提取。静电显微高速摄像实验系统示意图和实物图如图 1 所示，主要由高压供电系统、显微高速摄像系统和实验测试平台构成。试验时，利用微量移液器 (Brand Transferpette) 向样槽内滴加微米级水滴。任意波形发生器 (Rigol DG2041A) 输出的信号经高压功率放大器 (Trek 20/20C，变比为 1∶2000) 升压后施加于实验样槽两端。高速摄像仪 (NAC Hotshot 1280，帧频 1000fps) 与高倍显微镜头 (Mitutoyo，5×) 配合使用，观察、记录直流电场作用下水滴的微观行为。将示波器 (Tektronix TDS1000B-SC) 输入端与高压功率放大器的电压与电流监测端口相连，以获得实验过程中的相关电压、电流参数。透明实验样槽由有机玻璃制成，极板采用不锈钢制成，如图 2 所示。高压极板与高压功率放大器输出端相连，低压极板接地，从而建立微观实验所需的高强电场。



1. 示波器；2. 工控机；3. 任意信号发生器；4. 高压功率放大器；5. 高速摄像仪；6. 微观样槽；7. 冷光源
I. 电压监测端；II. 电流监测端；III. 信号输入端；IV. 高压输出端；V. 接地端

图 1 静电显微高速摄像实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electrostatic microscopic experiment system with high speed camera

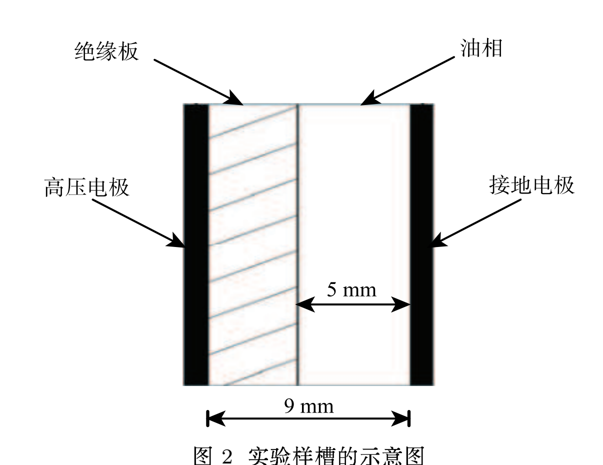


图 2 实验样槽的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental cell

1.2 实验介质与物性

连续相：选取无色透明的硅油作为连续相介质。

分散相：蒸馏水。同时，向蒸馏水中加入 KCl 和表面活性剂 (十二烷基苯磺酸钠)，分别改变分散相电导率和油水界面张力。

表 1　硅油的黏度和两相黏度比 (25°C)

Table 1　The viscosity of silicone oil and viscosity ratio of two phase (25°C)

No.	黏度/mPa·s	两相黏度比/10^{-3}
1#	980	0.912
2#	945	0.946
3#	900	0.993
4#	849	1.053
5#	806	1.109
6#	760	1.176
7#	716	1.249
8#	380	2.350

1) 黏度

分散相 (蒸馏水) 在 25°C 时的动力黏度为 0.894 mPa·s。连续相 (硅油) 的黏度采用 Anton Paar 旋转黏度计测量。25°C 下硅油的黏度如表 1 所示。

2) 电导率

连续相电导率采用 GD29YX1154B 油料电导率仪进行测量，25°C 时硅油的电导率为 8×10^{-14} S/m。分散相的电导率采用 DDS-11A 电导率仪进行测量。25°C 时 KCl 水溶液的电导率如表 2 所示。

表 2　KCl 水溶液的电导率和两相电导率比 (25°C)

Table 2　The conductivity of KCl aqueous solution and conductivity ratio of two-phase (25°C)

KCl 水溶液的浓度/mg·L^{-1}	电导率/S·m^{-1}	两相电导率比/10^{11}
0	0.020	2.500
375	0.102	12.750
750	0.190	23.750
1500	0.305	38.125
3000	0.515	64.375
6000	0.970	121.250
12000	1.923	240.375

3) 界面张力

基于 Taylor 的经典线性渐进理论 (式 (2))，通过小变形下水滴变形度与电场强度的关系来测量油水界面张力值。Karyappa [11] 和 Varshney [14] 等学者也采用了该方法测量油水界面张力值。

$$\gamma=\frac{9r\varepsilon_{\rm r}\varepsilon_0E^2}{16D} \tag{2}$$

其中，D 为水滴在直流电场作用下的变形度：

$$D=\frac{a-b}{a+b} \tag{3}$$

式中，a 和 b 分别为直流电场作用下水滴变为椭球形时的半轴长，r 为水滴半径，ε_r 为分散相的相对介电常数，ε_0 为真空介电常数，E 为电场强度。

采用静电显微高速摄像实验系统，对直流电场作用下油中水滴的变形度测量 3 次，取 3 组变形度的平均值。之后，利用式 (2) 计算得到油水界面张力值。由图 3 可以看出，当表面活性剂浓度为 0~200 mg·L^{-1} 时，随着表面活性剂浓度增加，油水界面张力值急剧减小；当表面活性剂浓度为 200~1000 mg·L^{-1} 时，油水界面张力值趋于稳定，维持在 3 mN·m^{-1} 左右。

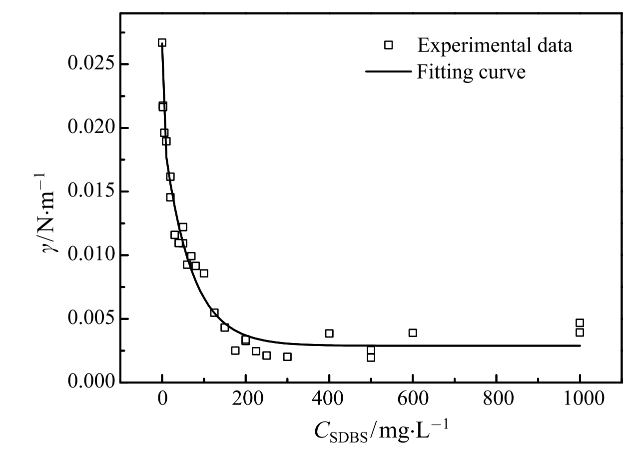


图 3　油水界面张力值与表面活性剂浓度 ($C_{\rm SDBS}$) 的关系

Fig. 3　Interfacial tension between silicone oil and water with different concentrations of SDBS

2　实验结果与讨论

2.1 水滴破裂前的响应过程

直流电场作用下，水滴破裂前的拉伸过程对其破裂时间具有显著的影响，因此在探究水滴破裂的时间特征前，首先对液滴破裂前的拉伸过程进行讨论。研究发现，在临界电毛细数 Ca_c 附近，直流电场作用下水滴破裂前的拉伸过程可分为 3 个阶段，如图 4 所示。水滴拉伸过程中的变形度采用无量纲数 l^* 表征：

$$l^*=\frac{a}{r} \tag{4}$$

1) 第 I 阶段

在第 I 阶段，水滴变形度快速增加。这主要是由于水滴初始变形时，水滴端部的曲率半径较大，导致静电压力远远大于毛细压力，水滴在几十毫秒内由球状被迅速拉伸至椭球状。

2) 第 II 阶段

随水滴变形度不断增大，其长轴顶端曲率半径不断减小，使得毛细压力增加，不断接近静电压力，导致水滴变形度增加速率降低，此时水滴变形度 l^* 为 1.3 左右。

3) 第 III 阶段

当 l^* 达到 1.6 左右时，水滴变形度再次快速增加，直至水滴出现颈缩而破裂。其原因是：长轴顶端与电极板的距离不断减小，引起局部电场强度增加，导致水滴变形度再次快速增加，直至破裂。

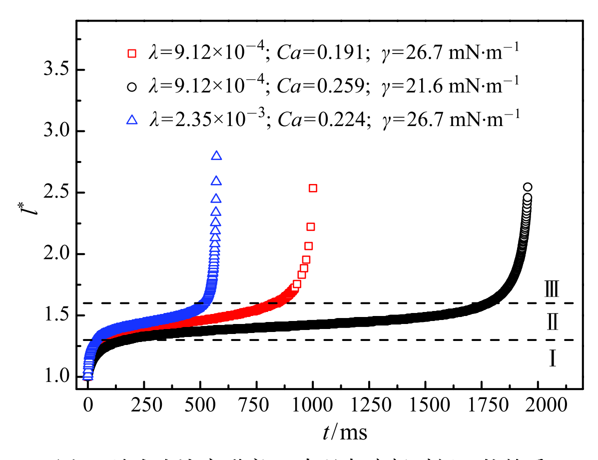


图 4 油中水滴变形度 l^* 与施加电场时间 t 的关系

Fig. 4 The relationship between the deformation degreel^* of water droplet in oil and the time t of applying electric field

图 5 为 λ=9.12×10^{-4}、R=2.5×10^{11} 和 C_{SDBS}=0 mg·L^{-1} 时，不同电毛细数 Ca 下油中水滴破裂前的拉伸过程。由图 5 可知，在该条件下，油中水滴的拉伸过程只有 2 个阶段，第 II 阶段并不存在，拉伸时间缩短至几十毫秒。

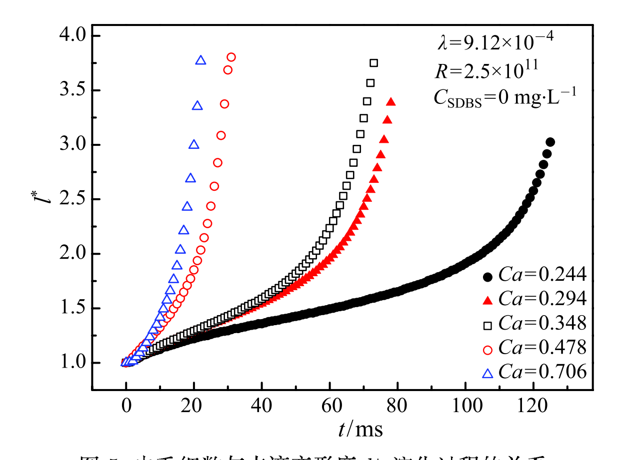


图 5 电毛细数与水滴变形度 l^* 演化过程的关系

Fig. 5 Evolution process of deformation degree l^* of water droplet at different electric capillary number

2.2 黏度对响应时间的影响

瞬态响应时间是直流电场作用下水滴破裂过程的重要特征参数。因此，研究水滴破裂前拉伸响应时间的变化规律及其影响因素对控制水滴破裂有着重要的意义。结合国内外学者的研究成果，电场作用下液滴悬浮于另一个不相溶介质时，液滴破裂前的拉伸响应时间主要受电毛细数、表面活性剂浓度、黏度比和电导率比的影响：

$$t = f\left(Ca, \lambda, R, C_{\mathrm{SDBS}}\right) \tag{5}$$

针对直流电场作用下油中水滴破裂前的拉伸响应时间，利用 Rayleigh 特征时间尺度 t_{R} 对拉伸时间 t 进行无量纲化。Rayleigh 特征时间尺度 t_{R} 如式 (6) [17,18] 所示，无量纲拉伸时间 τ 如式 (7) 所示：

$$t_{\mathrm{R}} = \sqrt{\rho r^3/\sigma} \tag{6}$$

$$\tau = \frac{t}{t_{\mathrm{R}}} \tag{7}$$

式中，ρ 为水滴的密度。

图 6 为不同电毛细数下无量纲拉伸时间 τ 与黏度比 λ 的关系。由图 6 可以看出，水滴的无量纲拉伸时间 τ 基本不受黏度比的影响。但当黏度比不变时，水滴的无量纲拉伸时间 τ 随着电毛细数的增加而逐渐减小。

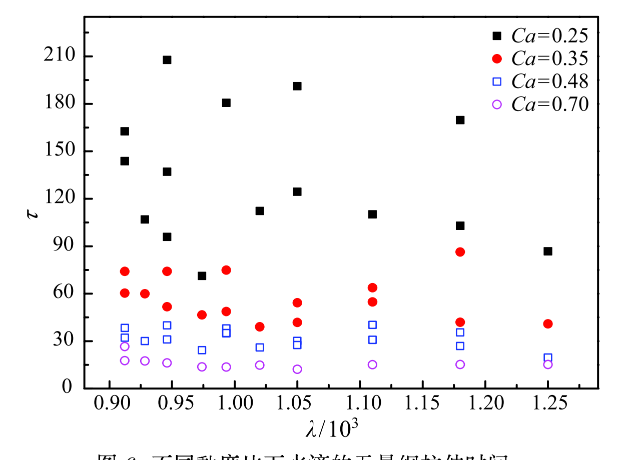


图 6 不同黏度比下水滴的无量纲拉伸时间 τ

Fig. 6 Dimensionless stretching time τ of water droplet at different viscosity ratio

2.3 电导率对响应时间的影响

图 7 为不同电毛细数下无量纲拉伸时间 τ 与电导率比 R 的关系。由图 7 可以看出，水滴的无量纲拉伸时间 τ 受电导率的影响较小。但当两相电导率比相同时，水滴的无量纲拉伸时间 τ 同样随电毛细数的增加而逐渐减小。

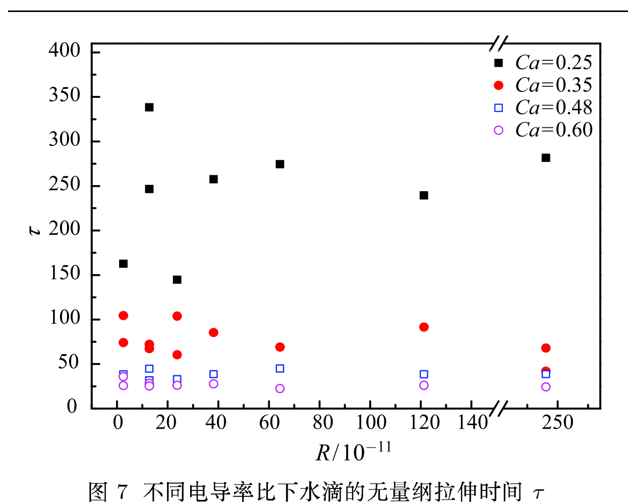


图 7　不同电导率比下水滴的无量纲拉伸时间 τ

Fig. 7　Dimensionless stretching time τ of water droplet at different conductivity ratio

由图 6 和图 7 可以看出，电毛细数是影响水滴无量纲拉伸时间的主要因素，且电毛细数越小，水滴无量纲拉伸时间逐渐增加且分布范围增大。水滴无量纲拉伸时间的分布范围与电毛细数之间的关系如表 3 所示。

表 3　不同电毛细数下水滴的拉伸时间的分布范围

Table 3　The stretching time distribution of water droplet at different electric capillary number

Ca	τ/ms
0.25	>90
0.35	45-90
0.48	30-45
0.7	<30

2.4　表面活性剂对响应时间的影响

图 8 为不同电毛细数下无量纲拉伸时间 τ 与表面活性剂的关系。由图 8 可以看出，无量纲拉伸时间 τ 在不同电毛细数和不同表面活性剂浓度 $C_{\rm SDBS}$ 下有显著的差异。当表面活性剂浓度相同时，由于水滴受到的静电压力随电毛细数的增加而增加，因此水滴的无量纲拉伸时间 τ 随电毛细数的增加而逐渐减小；但当电毛细数值相同时，水滴的无量纲拉伸时间 τ 随表面活性剂浓度的增加而增加。随水滴的变形度逐渐增加，由于油水界面处表面活性剂浓度的分布不均匀，导致油水界面产生 Marangoni 效应。随表面活性剂浓度增加，Marangoni 效应愈发显著，使得水滴变形阻力增加、拉伸时间变长。

综上所述，电毛细数 Ca 和表面活性剂浓度 $C_{\rm SDBS}$ 是影响水滴拉伸时间的关键因素，而油水黏度比和电导率比对水滴拉伸时间的影响并不显著。图 9 为直流电场作用下水滴破裂前无量纲拉伸时间 τ 与电毛细数和表面活性剂浓度的关系。由图 9 可以看出，无量纲拉伸时间 τ 对低电毛细数和高表面活性剂浓度的敏感程度更强。

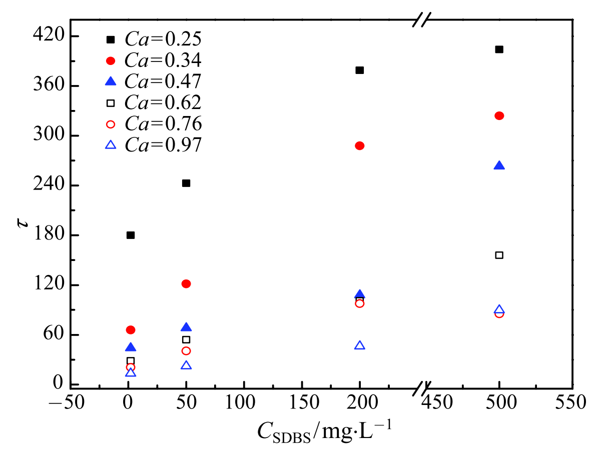


图 8　不同电毛细数下无量纲拉伸时间 τ 与表面活性剂浓度的关系

Fig. 8　The relationship between dimensionless stretching time τ and surfactant concentration at different electric capillary number

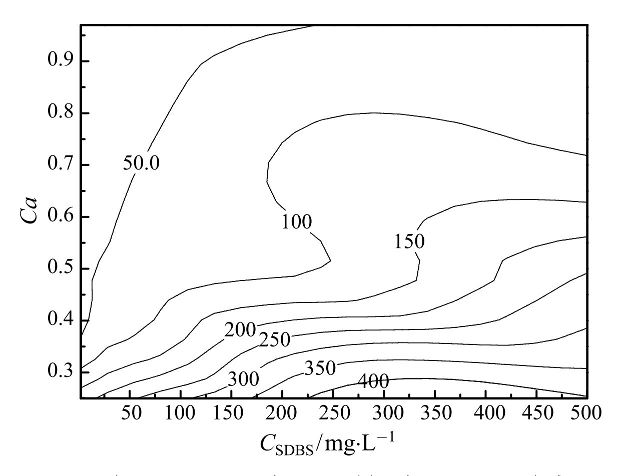


图 9　不同电毛细数 Ca 和表面活性剂浓度 $C_{\rm SDBS}$ 下水滴无量纲拉伸时间 τ

Fig. 9　The dimensionless stretching time τ at different electric capillary number Ca and different concentration of SDBS

图 10 为水滴拉伸时间 t 和电毛细数 Ca 之间的关系。从图 10 中可以看出，水滴的拉伸时间随电毛细数的增加而逐渐减小。当电毛细数较高时，拉伸时间 t 均在 10 ms 以上，说明球形水滴破裂响应过程需要的最小时间 t_0 为 10 ms。

利用拉伸时间可为设计能够促进水滴的聚并并抑制破裂行为的脉冲电场提供理论依据。为了确保电场作用下油中水滴不发生破裂行为，设计如图 11 所示的脉冲波形，脉冲宽度小于水滴的拉伸时间，即 $t_{\rm w} < t_0$。占空比需根据水滴变形后的恢复时间来确

定，从理论上分析，当无电场作用时，即电场强度为 0 时，水滴由最大变形度恢复至球形的过程中仅依靠毛细压力；若毛细压力小于静电压力和毛细压力的差值，则水滴恢复时间将大于 t_0，因此占空比小于 0.5，脉冲电场的周期 $T > 2t_w$。

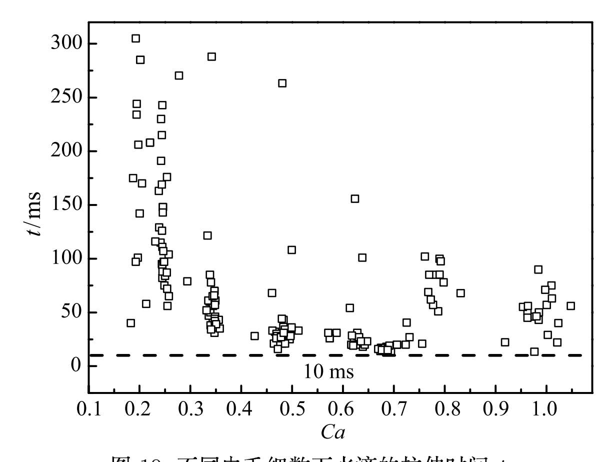


图 10 不同电毛细数下水滴的拉伸时间 t
Fig. 10 The stretching time t of water droplet at different electric capillary number Ca

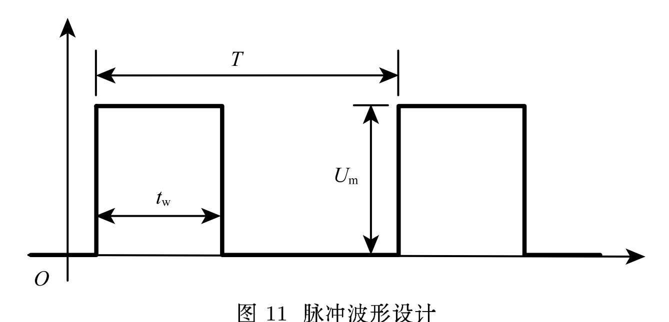


图 11 脉冲波形设计
Fig. 11 The design of pulse waveform

在电脱水器中，若电场强度过低将降低油水分离效率，而高电场强度则增加了电分散现象发生的风险。通过研究不同油水体系下水滴在电场作用下的破裂时间，并利用优化的脉冲电场对水滴的变形程度加以控制，可在有效提高水滴变形度的同时抑制电分散现象。当脉冲电场处于高电平时，油中水滴的变形度逐渐增加，促进水滴间的聚并，由于脉冲宽度低于水滴破裂前所需的最短拉伸时间，因此水滴不会发生颈缩和破碎过程；当脉冲电场处于低电平时，水滴恢复为球状。因而，理论上，在整个周期内油中水滴不会产生破裂行为。

3 结　论

采用显微实验与理论分析相结合的方法，对直流电场作用下水滴破裂前的不同拉伸过程进行了详细描述，并对水滴破裂前的拉伸时间进行了系统研究，主要结论如下：

1) 当电毛细数 Ca 在水滴破裂所需的临界电毛细数 Ca_c 附近时，直流电场作用下水滴破裂前的拉伸过程可分为 3 个阶段；随电毛细数 Ca 逐渐增加，拉伸过程的第二阶段消失，拉伸过程更为迅速；

2) 电毛细数 Ca 和表面活性剂浓度 C_{SDBS} 是影响水滴拉伸时间的关键因素，而油水黏度比和电导率比对水滴拉伸时间的影响并不显著。且拉伸时间对低电毛细数和高表面活性剂浓度体系更为敏感。

3) 提出了一种基于水滴破裂时间特征的可有效提高水滴静电聚并效率并抑制电分散现象的脉冲电场设计方法。由本文的实验结果可知，球形水滴的破裂响应过程需要的最小时间 t_0 为 10 ms，因此脉冲宽度小于水滴的拉伸时间，即 $t_w < t_0$。

参 考 文 献

[1] 康万利. 大庆油田三元复合驱化学剂作用机理研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001
KANG Wanli. Action mechanism of ASP Flooding Surfactant in Daqing Oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001

[2] 骆政园, 和龙, 白博峰. 具有复杂界面的三维弹性液滴动力学模拟 [J]. 工程热物理学报, 2014, 35(6): 1132–1135
LUO Zhengyuan, HE Long, BAI Bofeng. Three-dimensional Numerical Simulation of Dynamics of Elastic Capsules [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(6): 1132–1135

[3] 杨东海, 何利民, 罗小明, 等. 新型静电聚结器中水滴聚结特性研究 [J]. 高校化学工程学报, 2012, 26(2): 222–227
YANG Donghai, HE Limin, LUO Xiaoming, et al. Investigation on Coalescence Characteristics of Water Droplets in New Type Electrostatic Coalescer [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2012, 26(2): 222–227

[4] Bailes P J, Larkai S K L. Experimental Investigation Into the Use of High Voltage D. C. Fields for Liquid Phase Separation [J]. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1981, 59(4): 229–237

[5] Taylor G. Disintegration of Water Drops in an Electric Field [C]//Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. The Royal Society, 1964, 280(1382): 383–397

[6] Eow J S, Ghadiri M, Sharif A O. Electrostatic and Hydrodynamic Separation of Aqueous Drops in a Flowing Viscous Oil [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2002, 41(8): 649–657

[7] Eow J S, Ghadiri M, Sharif A. Deformation and Break-up of Aqueous Drops in Dielectric Liquids in High Electric Fields [J]. Journal of Electrostatics, 2001, 51(1): 463–469

[8] 叶团结. 正弦交流电场中水滴变形破裂聚结微观特性研究 [D]. 山东: 中国石油大学 (华东), 2010

YE Tuanjie. Deformation Rupture and Coalescence Micro-Characteristics of Drops in Sinusoidal AC Field [D]. Shandong: China University of Petroleum (East China), 2010

[9] Dubash N, Mestel A J. Breakup Behavior of a Conducting Drop Suspended in a Viscous Fluid Subject to an Electric Field [J]. Physics of Fluids, 2007, 19(7): 072101

[10] Sherwood J D. Breakup of Fluid Droplets in Electric and Magnetic Fields [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 188(4): 133–146

[11] Karyappa R B, Deshmukh S D, Thaokar R M. Breakup of a Conducting Drop in a Uniform Electric Field [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 754(8): 550–589

[12] Yan H, He L, Luo X, et al. Investigation on Transient Oscillation of Droplet Deformation Before conical Breakup Under Alternating Current Electric Field [J]. Langmuir, 2015, 31(30): 8275–8283

[13] Allan R S, Mason S G. Particle Behaviour in Shear and Electric Fields. I. Deformation and Burst of Fluid Drops [C]//Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. The Royal Society, 1962, 267(1328): 45–61

[14] Varshney A, Ghosh S, Bhattacharya S, et al. Self Organization of Exotic Oil-in-oil Phases Driven by Tunable Electrohydrodynamics [J]. Scientific Reports, 2012, 2(10): 1–6

[15] Moriya S, Adachi K, Kotaka T. Deformation of Droplets Suspended in Viscous Media in an Electric Field. 1. Rate of Deformation [J]. Langmuir, 1986, 2(2): 155–160

[16] Basaran O A, Scriven L E. Axisymmetric Shapes and Stability of Charged Drops in an External Electric Field [J]. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 1989, 1(5): 799–809

[17] Raisin J, Atten P, Reboud J L. A Novel Actuation Technique for the On-demand Injection of Charge-free Conducting Droplets in a Viscous Dielectric Liquid [J]. Experiments in Fluids, 2013, 54(3): 1–14.

[18] Wu M, Cubaud T, Ho C M. Scaling Law in Liquid Drop Coalescence Driven by Surface Tension [J]. Physics of Fluids, 2004, 16(7): L51–L54